

基于 IEC 61850 的变电站间隔层 保护监控设备硬件设计框架

姚东晓¹, 周有庆¹, 高乐¹, 彭红海¹, 王嗣常¹, 王晓芳²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082; 2. 邵阳学院, 湖南省邵阳市 422004)

IEC 61850 Based Design Framework of Hardware for Protection and Monitoring Devices of Bay Level in Substation Automation System

YAO Dong-xiao¹, ZHOU You-qing¹, GAO Le¹, PENG Hong-hai¹, WANG Si-chang¹, WANG Xiao-fang²

(1. School of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China;

2. Shaoyang University, Shaoyang 422004, Hunan Province, China)

ABSTRACT: In this paper a mapping model that maps various logical interfaces in substation automation system to independent physical interfaces is constructed according to IEC 61850 standard and a distributed information-processing mode based hardware framework for protection and monitoring devices of the bay level is proposed. Taking the bay of high voltage transmission line for example, the function allocation condition of the plug-in units of this equipment is expounded. In addition, a bay level local area network (LAN) consisting of new types of protection and monitoring devices is built. The results of calculation and analysis of the load and time-delay in this LAN show that by use of the protection and monitoring devices based on the constructed hardware structure, the requirement of real-time communication in the LAN for substation bay level can be satisfied.

KEY WORDS: IEC 61850; substation automation system; bay level; process level; abstract communication service interface (ACSI); physical interface; performance of communication network

摘要: 依据 IEC 61850 标准构建了变电站自动化系统各逻辑接口到物理接口的映射模型, 提出了基于分布式信息处理模式的变电站间隔层保护监控设备硬件框架, 以高压线路间隔为例, 阐述了该设备内部插件的功能分配情况。文章还构造了由新型保护监控硬件设备组成的间隔层局域网, 对该网络的负荷及延时进行了模拟计算和分析, 结果表明, 新型结构的保护监控设备能够满足变电站间隔层局域网的通信实时性要求, 具有可行性。

关键词: IEC 61850; 变电站自动化系统; 间隔层; 过程层; 抽象通信服务接口(ACSI); 物理接口; 通信网络性能

0 引言

IEC 61850 标准^[1]的提出促进了电力系统保护、监控功能朝着网络化、信息化方向发展。变电站过程层的数字化^[2]也使得保护监控系统不再依靠大量电缆来传输过程层参数, 而是通过过程层串行通信网络来传输采样值、一次设备状态及上层设备的控制命令。这些新技术的应用可以简化变电站二次接线, 提高变电站智能电子设备(intelligent electronic device, IED)之间的互操作性, 但同时对 IED 的通信性能和处理速度提出了更高的要求^[3-4], 因此有必要对新技术所需的物理平台进行研究。

本文根据 IEC 61850 标准对变电站自动化系统各功能之间不同逻辑接口的信息流量及其通信实时性要求, 将变电站自动化系统高速和中低速逻辑接口分别映射到独立的物理接口, 并在此基础上提出一种基于分布式结构的变电站间隔层保护监控设备硬件实现方案。

1 基于 IEC 61850 的变电站通信模型

变电站自动化系统的功能是对变电站中各一次元件进行监视和控制, 以便及时切除故障, 保护一次设备, 从而提高电力系统的稳定性及可靠性, 这需要许多不同功能的 IED 协同工作。IEC 61850 标准正是针对这种需求, 通过将变电站自动化系统的功能进行分解, 然后对各功能及相关设备进行面向对象的信息建模来实现 IED 间良好的互操作性。该标准定义了多种抽象通信服务接口类, 通过这些

类来建立与变电站自动化功能相关的信息模型及信息交换服务模型。各类模型在物理设备中的实例具有唯一路径，通过其路径即可访问其相关数据及属性，并且这种实例路径可通过其上级容器类的读目录服务获得。这有利于系统内部及系统之间各功能建立无缝通信连接。

IEC 61850 将变电站自动化系统功能分为 3 层：变电站层、间隔层和过程层^[1]。各层功能的分布方式及与之相关的逻辑接口的信息流量是决定整个变电站自动化系统通信构架的重要因素，也是间隔层设备物理接口配置的基础^[5-6]。

根据各逻辑接口的通信流量，在满足实时性要求的前提下，可以采用不同的方式将逻辑接口映射到物理接口。本文根据 IEC 61850 第 5 部分对 4 种逻辑接口数据流量的评估结果及各逻辑接口对通信实时性的要求，构建了图 1 所示的映射方案。该方案将逻辑接口 8 单独映射到一个物理接口，连接到专门用于间隔层设备互联的局域网，以保证间隔间快速报文传输的实时性及可靠性。逻辑接口 1、3、6、9 主要传输中低速报文，对实时性要求不高，因此可以映射到一个物理接口，连接到站级总线。逻辑接口 4、5 组成过程层总线，由于要传输大量实时生数据报文和与过程控制相关的快速报文，因此每个间隔安排一个过程总线。

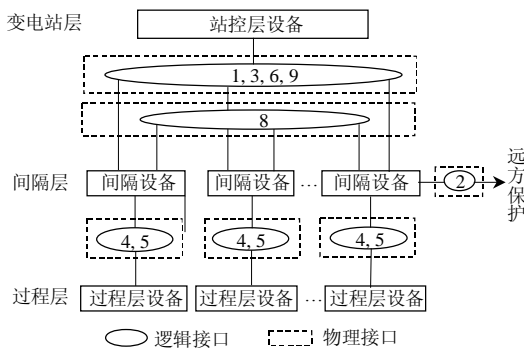


图 1 逻辑接口到物理接口的映射
Fig. 1 Mapping from logical interfaces to physical interfaces

2 间隔层保护监控设备硬件框架

2.1 整体结构

间隔层保护监控设备的功能和传统设备基本一致，只是信息的输入输出采用以太网串行通信来实现。以太网技术经过长期的发展已相当成熟，通信速率高，支持全双工，易于组建局域网，并且具有良好的经济性。

为说明变电站间隔层保护监控设备工作的网络环境，首先将图 1 所示的接口映射模型实例化^[7-13]。以高压线路间隔的保护监控为例，其系统接线见图 2。图中：合并单元与断路器智能操作箱作为过程层单元，与间隔层保护监控设备 A 的过程层接口组成过程层网络，用于传输采样值、分合闸命令等信息；设备 A 的差动保护接口通过光纤通道远方差动保护装置，用于实现一次线路的纵联差动保护功能；与设备 A 同级的间隔层智能装置通过间隔层接口互联，完成间隔之间的联锁或分布式保护功能；设备 A 的故障录波接口连接变电站内的故障录波网络，以方便监控终端获取故障录波数据；设备 A 通过变电站通信前置机与变电站监控主机及远方监控中心相连，以实现本地操作员及远方监控中心的监控功能；全球定位系统(global positioning system, GPS)接收卫星信号，从中提取出时钟信号并向全站 IED 提供 GPS 秒脉冲，用于同步全站 IED 的时间。

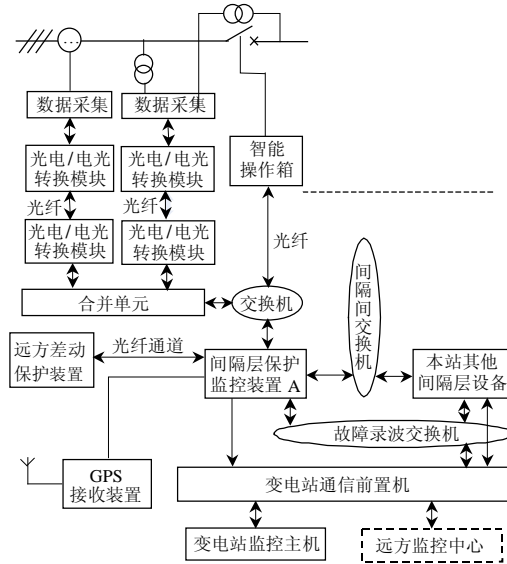


图 2 间隔层保护监控设备系统接线示例
Fig. 2 Wiring example diagram of bay level protection and monitoring devices

变电站自动化系统的这种实现方式支持间隔层保护监控设备硬件平台的通用性和标准化，其结构得益于变电站二次设备的数字化，同时又有利于整个变电站的数字化运行。根据图 2 构建间隔层保护监控设备硬件框架，如图 3 所示。若需要不同的保护监控功能，只要在该硬件平台中配置不同的逻辑功能模型即可。这里仍以高压线路间隔为例说明其保护监控功能在装置内部的配置情况。

图 3 中，设备功能插件共包括 6 部分：①内部交换机及 GPS 插件，用于组建装置内部的过程局域

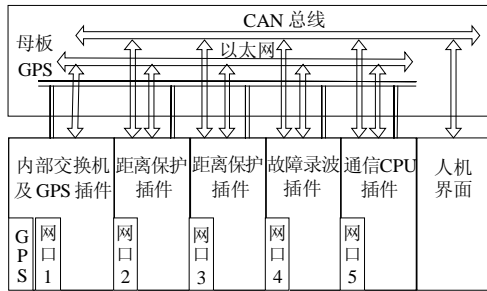


图3 高压线路保护监控设备硬件框架

Fig. 3 Hardware block diagram of protection and monitoring device for high voltage line

网及向其他各功能插件传送 GPS 秒脉冲, 网口 1 接本间隔过程层网络, 主要传输采样值报文及面向通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)报文; ②距离保护插件, 用于实现高压线路的距离保护功能, 网口 2 接其它间隔层保护监控设备, 实现间隔层之间的通信; ③差动保护插件^[14-15], 用于实现差动保护功能, 网口 3 接线路另一端差动保护设备; ④故障录波插件, 用于监视本间隔各种参数变化及设备的状态, 在启动条件满足时对相关参数及状态进行采集并存储到非易失性存储器中, 网口 4 配置为故障录波输出接口; ⑤通信 CPU 插件, 主要负责与变电站监控主机进行通信, 用于配置其它插件的功能投退及保护定值等参数, 同时接收监控主机命令以及向监控主机或远方控制中心提交本间隔的所有参数及相关设备状态值, 网口 5 接站控层网络; ⑥人机界面模块, 用于人机交互, 通过装置内部 CAN 总线与其它各插件通信, 可以在本地直接设置装置的功能及参数。

2.2 CPU 插件

图 3 中各 CPU 插件(距离保护、差动保护、故障录波、通信 CPU)虽然功能不同, 但硬件结构完全相同, 如图 4 所示。其中: 电可擦写可编程只读存储器(electrically erasable programmable read-only memory, EEPROM)用于存储本插件逻辑功能的控制字、定值参数或故障录波数据; 时钟模块用于为

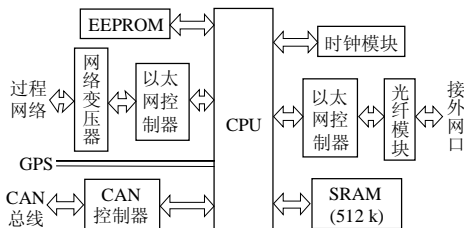


图4 保护监控设备 CPU 插件硬件框图

Fig. 4 Hardware block diagram of CPU plug-in unit in protection and monitoring device

各报文提供准确的时间标识; 以太网控制器连接装置内部过程网络, 用于传输系统的数据采样及分合闸命令等报文; 接外网口的功能根据插件的具体功能而定; CAN 总线负责与通信 CPU 插件及人机界面插件进行通信, 接收对本插件的配置信息及输出本插件功能相关信息; 静态随机存储器(static random access memory, SRAM)用于实时数据缓冲及程序下载、运行。

通信 CPU 插件与其它 CPU 插件虽都和内部过程层网络相连接, 但其用途并不相同。其它 CPU 插件需要过程总线上的采样值、控制命令等多播报文, 通信 CPU 插件并不需要, 它与内部过程网络相连只是为了快速访问其它 CPU 插件, 满足相关功能对通信实时性的要求。

2.3 人机界面插件

图 3 中人机界面插件只负责人机交互, 通过 CAN 总线实现装置配置信息下载及实时运行信息的采集, 通过按键、指示灯和显示器与人交互。其硬件结构如图 5 所示。EEPROM 用于存储对装置的最后设置值。

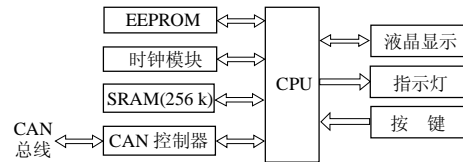


图5 保护监控设备人机界面插件硬件框图

Fig. 5 Hardware block diagram of human-machine interface plug-in unit in protection and monitoring device

2.4 内部交换机及 GPS 插件

内部交换机及 GPS 插件用于构建装置内部的局域网及驱动 GPS 秒脉冲, 其结构如图 6 所示。网口 1 连接间隔中过程层设备组成的局域网, 其它接口连接装置内部各功能插件板, 传输装置所在间隔中与各过程单元相关的实时数据, 为保护和监控功能模块提供数据源, 并负责输出保护监控功能模块对过程单元的控制命令。

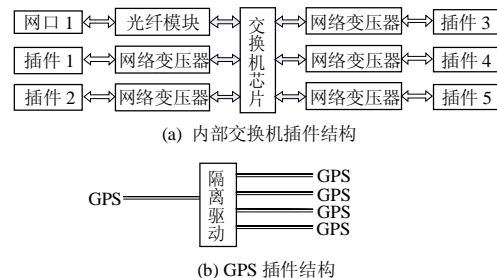


图6 内部交换机及 GPS 插件结构框图

Fig. 6 Block diagram of internal switches and GPS plug-in unit

3 变电站间隔层局域网通信性能分析

根据图 1 的通信接口映射模型, 结合图 3 构造出变电站自动化系统间隔层局域网, 如图 7 所示。图中, 交换机只代表独立的局域网, 并非实际的交换机, 比如交换机 1.1 和 1.2 可能分布在同一个交

换机中, 只是被划分在不同的虚拟局域网(virtual local area network, VLAN)。另外间隔 x 合并单元并非指该间隔中只有 1 个合并单元, 可以含有多个, 比如大型多绕组变压器间隔, 其每侧的电气参数可由 1 个独立的合并单元来采集。

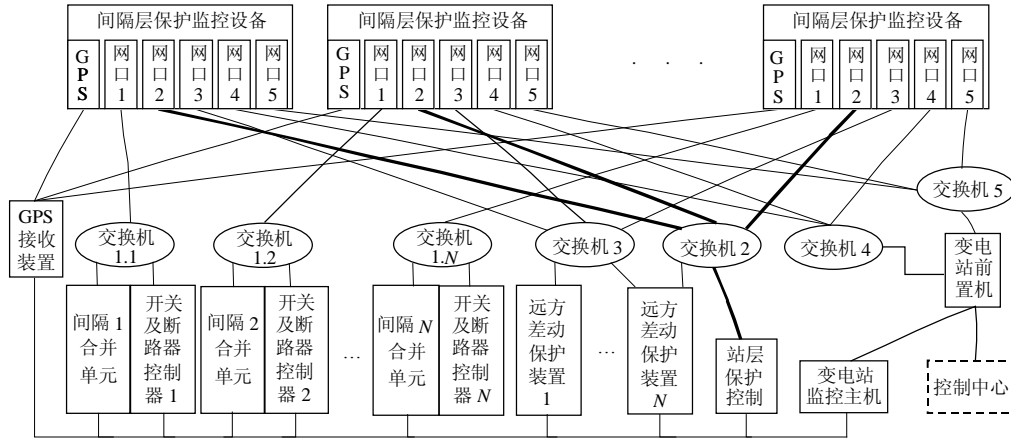


图 7 基于新型结构保护监控装置的间隔层局域网

Fig. 7 Diagram of the bay level LAN based on protection and monitoring devices with new structure

为分析图 7 所示网络的通信性能, 做以下假设: ①变电站每个间隔含 1 个间隔层保护监控设备, 最多可含有 3 个合并单元, 合并单元采样速率为每周期 48 点; ②变电站母线最多含有 12 条进出线, 采用分布式母线保护, 由站控层设备实现母线保护算法及逻辑判断; ③所有交换机采用存储转发式交换机。

首先以含有 3 个合并单元的变压器间隔为例计算过程层网络负荷。合并单元发送的数据帧长度固定, 为 $984 \text{ bit}^{[1]}$, 由合并单元产生的网络负荷计算公式为

$$S_R \times T_L \times N_{MU} = (48 \times 50) \times 984 \times 3 = 7.0848 \text{ Mbit/s} \quad (1)$$

式中: S_R 为采样速率; T_L 为以太网帧长度与帧间隙之和, 对于采样值报文, 其帧长度为 888 bit , 而帧间隙为 96 bit , 故 T_L 为 984 bit ; N_{MU} 为合并单元数目。

过程层网络除传输合并单元的采样值报文外, 还要传输间隔层保护监控设备的命令报文及断路器控制器的状态报文。这 2 种报文所产生的负荷很小, 而且由于网络中各端口工作在全双工(合并单元除外)方式, 支持报文的优先级, 因此其实时性基本取决于上行报文(由过程层设备到间隔层设备的报文)在交换机中的延时。假设 3 个合并单元及断路器控制器在同一时刻向间隔层保护监控设备发送报文, 则报文在交换机中的延时为^[2]

$$D_q = \sum_{k=1}^{N_q} (96 + L_k) T_b \quad (2)$$

式中: N_q 为交换机缓冲区帧的个数, 由上面假设可知, $N_q=4$; T_b 为传输 1 bit 所需时间, 这里采用 100 M 快速以太网, 则 $T_b=0.01 \mu\text{s}$; L_k 为第 k 帧报文长度, 采样值报文长度为 888 bit , GOOSE 报文为 1521 bit 。将各参数的值代入(2)式可得延时为 $45.69 \mu\text{s}$, 这在采样值报文要求的 $3\sim 10 \text{ ms}$ 的传输时间中所占比重很小, 对实时性影响不大。

下面分析由交换机 2 所构成网络的通信实时性能。为定量计算, 只分析通过母线各进出线路保护联合来实现母线保护的情况(其基本原理是利用线路保护中的反功率方向元件来反映母线故障情况)。

当含有 12 条进出线的母线发生故障时, 各进出线保护单元同时向母线保护单元发送包含允许信息的 GOOSE 报文。根据式(2)可以得到 12 条报文在交换机中的延时为 $182.52 \mu\text{s}$ 。在长度为 L 的通信线路上的延时为 $L/(2.0 \times 10^8)$, 计算可得长度为 100 m 的通信线路延时仅为 $0.5 \mu\text{s}$, 可以忽略不计。另外, 为了保证实时性, GOOSE 报文采用简化的通信协议栈, 以降低协议栈的处理时间。

由交换机 3 构建的局域网实际相当于并行的端对端连接, 采用交换机只是为了增加配置的灵活性。由于交换机端口之间可实现高速全双工通信,

故与差动保护物理通信接口直接相连差别不大,只是增加了一个存储转发的延时,该延时可由式(2)计算得出,对于100 M的以太网,长度为1 521 bit的数据帧在交换机中的延时仅为16.17 μ s,对实时性影响很小。对于交换机4、5所构建的局域网,由于所传输报文对实时性要求不高,可以采用复杂协议栈来保证通信的可靠性。

4 结论

(1) 根据变电站自动化系统各逻辑接口的数据流量及IEC 61850标准对其所传输报文的实时性要求,将其映射到不同的局域网络,实现了快速报文与中低速报文在物理信道上的解耦,保证了采样值、GOOSE等快速报文的通信时延要求。

(2) 本文提出的新型结构的间隔层保护监控设备实现了装置内部功能的分布式处理,使各物理接口的瞬时通信负荷不至于过大。计算表明该设备的硬件结构能够满足与快速功能相关的局域网的通信实时性要求,是完全可行的。

参考文献

- [1] IEC61850, Communication networks and systems in substations [S]. 2003.
- [2] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于IEC61850标准的过程总线通信研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 84-89.
Yin Zhiliang, Liu Wanshun, Yang Qixun, et al. Research and implementation of the communication process bus based on IEC61850[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 84-89(in Chinese).
- [3] 窦晓波, 吴在军, 胡敏强. 借鉴IEC61850功能分层的保护装置的设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 65-70.
Dou Xiaobo, Wu Zaijun, Hu Minqiang. Design of protection by referring to function leveling in IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 65-70(in Chinese).
- [4] Kim G S, Lee H H. A study on IEC 61850 based communication for intelligent electronic devices[C]. The 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, Korus, America, 2005.
- [5] 窦晓波, 吴在军, 胡敏强, 等. IEC61850标准下合并单元的信息模型与映射实现[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 80-86.
Dou Xiaobo, Wu Zaijun, Hu Minqiang, et al. Information model and mapping implementation of merging unit based on IEC61850 [J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 80-86 (in Chinese).
- [6] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于IEC61850的通用变电站事件模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 45-50.
Yin Zhiliang, Liu Wanshun, Yang Qixun, et al. Generic substation event model based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 45-50(in Chinese).
- [7] 吴在军, 窦晓波, 胡敏强. 基于IEC61850标准的数字保护装置建模[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 81-84.
Wu Zaijun, Dou Xiaobo, Hu Minqiang. Modeling of digital protective device according to IEC61850[J]. Power System Technology, 2005, 29(21): 81-84(in Chinese).
- [8] 吴在军, 胡敏强, 杜炎森. 嵌入式以太网在变电站通信系统中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 71-75.
Wu Zaijun, Hu Minqiang, Du Yansen. Application of embedded ethernet to communication networks in substations[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 71-75(in Chinese).
- [9] Anderson L, Brunner C. Substation Automation based on IEC 61850 with new process-close technologies[C]. Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy, 2003.
- [10] Apostolov A, Auperrin F, Passet R, et al. IEC61850 process bus based distributed waveform recording[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [11] Apostolov A P. Distributed protection, control and recording in IEC61850 based substation automation systems[C]. Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, 2004.
- [12] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 73-77.
Zhang Peichao, Gao Xiang. System Architecture of digitized substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77(in Chinese).
- [13] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-71.
Gao Xiang, Zhang Peichao. Main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71 (in Chinese).
- [14] 高湛军, 潘寅存, 从伟, 等. 基于光纤以太网的纵联保护通信方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 57-60.
Gao Zhanjun, Pan Zhencun, Cong Wei, et al. Research on pilot protection based on the fiber optic Ethernet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 57-60(in Chinese).
- [15] 及洪泉, 张健, 杨以涵, 等. 计及电子式电流互感器的差动保护性能分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 61-66.
Ji Hongquan, Zhan Jian, Yang Yihan, et al. Comment on performance of differential protection taking into account electronic current transducers[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 61-66 (in Chinese).



姚东晓

收稿日期: 2007-10-08.

作者简介:

姚东晓(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统微机保护及变电站自动化, E-mail: yaodongxiao1@163.com;

周有庆(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统微机保护及变电站自动化;

高乐(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统微机保护及变电站自动化;

彭红海(1972—), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统微机保护及变电站自动化;

王嗣常(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统微机保护及变电站自动化;

王晓芳(1965—), 女, 副教授, 从事继电保护的教学与研究工作。

(编辑 李兰欣)